動画用広色域色空間の新規格

中 枝 武 弘[†]

近年の広色域ディスプレイの開発を踏まえ、現在のデジタルビデオ信号規格であるITU-R BT.709/601規格の上位互換で、より広色域な色空間の規格であるxvYCC規格 (IEC61966-2-4) が2006年1月に制定された。本稿では、まず映像信号のさまざまな広色域化の方法を述べ、さらに、xvYCC規格の内容や広色域化の効果、ディスプレイの色域との関連について解説する。

キーワード：xvYCC，広色域，色空間

1. ま え が き

1.1 映像信号の原色点，伝送色域

最初のアナログカラー映像信号の規格は、NTSC (National Television Standards Committee)によって定められ(1953年)、CRTの赤、緑、青の蛍光体による各原色の色度点 (以下原色点) (図1の□)と白色点が定められた。この規格の原色点は、ITU (International Telecommunication Union)で定められたITU-R BT.470規格¹⁾に引き継がれている。

その後CRTの原色点は、蛍光体の長寿命化と画面輝度増

大のため、緑原色点は色度図上で右下方へ大きく移動し、赤原色点は左方へ多少移動した。約15年を経てほぼ現在と同様の値になり、SMPTE (Society of Motion Picture and Television Engineers)によってディスプレイの規格としてRP37規格が定められ (1969年)、その後RP145規格²⁾ (図1の×)に改められた (1987年)。これが現在のNTSC信号圏でのディスプレイの標準規格となっている。さらにPAL信号圏で、原色点が前記RP145規格と僅かに異なるディスプレイの規格が定められ、現在はEBU (European Broadcast Union) Tech.3213規格³⁾ (図1の+)となっている (1975年)。さらに、走査線数を増大したハイビジョンの信号規格としてSMPTE 240M規格⁴⁾ (1995年)が定められたが、ディスプレイとしてはRP145規格を参照していた。その後デジタル信号の時代に至り、現在はHDTVではITU-R BT.709規格⁵⁾ (図1の○)の原色点が標準になっている (1990年)。これらの規格の原色点と白色点の色度座標を表1に記載する。

PC等の静止画用ディスプレイとしては、IEC (International Electrotechnical Commission)によって、信号とディスプレイの規格であるsRGB規格⁶⁾ (IEC61966-2-1)が定められた (1999年)。この規格の原色点はBT.709規格と同一であるので、(ビデオ信号のオーバホワイトがないことを除けば)両者の色域は同一である。

結局、動画でも静止画でもCRTの赤、緑、青の蛍光体による各原色点で囲まれる三角形が色域となり、BT.709 (=sRGB)、SMPTE RP145、EBU Tech3213の間で若干の差はあるが、ほぼ同一の色域が実現されてきた。

1.2 高彩度の被写体

しかし、CRTの色域よりも高彩度 (広色域) である被写体も多々あり、我々の調査によれば、特に車の赤の塗料、赤からマゼンタ領域、黄色領域の花、シアン領域の海、ステンドグラスやLEDを光源とする道路信号等は色域外である。また、フィルム (例えばIT8のチャート) もCRTに比べ広色域であるし、SWOPや後述するMunsell Color Cascade

図1 各種規格のディスプレイの原色点

[†] ソニー株式会社 コアコンポーネント事業グループ コアテクノロジー開発本部 スタンダードシステム開発部 カラーレンダリング開発課
"New Standard for Extended Gamut Colour Space for Video Applications" by Takehiro Nakatsue (Color Rendering Development Section, Standard Systems Development Dept., Core Technology Development Group, Core Component Business Unit, Sony Corporation, Tokyo)

表1 各種規格のディスプレイの原色点

	赤	緑	青	白
NTSC, ITU-R BT.470	(0.67,0.33)	(0.21,0.71)	(0.14,0.08)	C光源
SMPTE RP145	(0.630,0.340)	(0.310,0.595)	(0.155,0.070)	D65
EBU Tech, 3213	(0.64,0.33)	(0.29,0.60)	(0.15,0.06)	D65
ITU-R BT.709, sRGB	(0.640,0.330)	(0.300,0.600)	(0.150,0.060)	D65

等の色票にも、高彩度の色が存在する。これらの色は従来の映像信号規格やCRTディスプレイでは、正しく撮影、伝送、表示することができなかった。

1.3 広色域ディスプレイの開発

近年、さまざまな発色原理の広色域ディスプレイが開発され、学会・展示会で発表されるとともに、製品化されたものもある。広色域化の手法は次の2種類に大別される。

- (1) 各原色の分光分布を特定波長領域に集中して高純度化し、ディスプレイを広色域化する方法
 - (a) レーザやLED等の狭帯域な光源の利用
 - (b) CCFLの蛍光体を工夫し特定波長領域の強度の上昇
- (2) (分光分布の狭帯域化は(1)ほどではないが) 原色数を増やし広色域化する方法
 - (a) 4色以上のカラーホイールを使用したDLPプロジェクト
 - (b) 4色以上のカラーフィルタを使用した液晶ディスプレイ

ディスプレイの色域を比較する方法は、例えば、色度座標上で原色点の囲む領域の面積を比較する方法の他に、特定の色票群の個々の色票がディスプレイの色域内に存在する含有率を比較する方法等があるが、前者が一般的である。例えば、「ディスプレイAのxy色度座標での原色点による三角形の面積は、NTSC規格の原色点による面積に対し71%である」などと表現する。

2. 映像信号規格の分類、および広色域化の方策

映像信号の規格は次の2種類に大別される。

- (1) RGBの3原色の強度を表す色信号を定義する規格(例えばsRGBやAdobe RGB, DCDM等)
- (2) (人の視覚系と同様に) 伝送帯域や記憶領域の節約を図るために、(色信号を変換した)輝度色度信号を定義する規格(例えばNTSC, PAL, BT.709, BT.601, sYCCやxvYCC等)

近年、カメラやディスプレイの広色域化に伴い、広色域の映像信号が規格化されてきた。広色域化の手法は次の2種類に大別される。

- (1) 色信号の原色点を高純度にする方法
 - (a) AdobeRGB (opRGB) 規格⁷⁾ (1998年) : Adobe社によるデジタルカメラ用の規格 (BT.709の赤、青

図2 色信号の負値の説明図

原色と、NTSCの緑原色を採用)。

- (b) DCDM規格⁸⁾ (2005年) : Digital Cinema Initiativeで制定されたデジタルシネマの編集用の規格。XYZ三刺激値に基づく色信号で定義された、スペクトルローカス内すべてを包含する規格である。表示する際の最低の色域が決められていて、BT.709規格よりも赤緑の色域が広い。

- (2) 色信号を負値まで拡張し、この負値を混色の原理で解釈する方法(伝送は色信号の場合と輝度色度信号の場合がある)。

例えば、色度図上で、赤 (Red), 緑 (Green), 青 (Blue) の原色点を結ぶ三角形の外にシアン (Cyan) があり、RedとCyanを結ぶ線とGreenとBlueを結ぶ線の交点に色Xがある場合を想定する(図2)。この場合、混色理論では色度図の性質から、色XはRedとCyan, GreenとBlueの混色で表せるので、

$$X \equiv \text{Red} + \text{Cyan} \equiv \text{Green} + \text{Blue} \quad (1)$$

と表記できる。このとき中央の辺と右辺に注目し、中央の辺のRedを右辺に移項すると、

$$\text{Cyan} \equiv \text{Green} + \text{Blue} - \text{Red} \quad (2)$$

と表記することができる。言い換えれば、Cyanは、色度図

上で、GreenとBlueを結ぶ線に対しRedと反対側に存在するが、色域外のこの色はRedを負の値にすれば表現することができる。

(a) sYCC規格⁹⁾ (2003年)：静止画のシステムにおいては、デジタルカメラで撮影した映像をsRGB規格でプリンタに伝送・印刷したのでは、近年拡大しつつあるプリンタの色域を十分に活用できないという問題に直面し、これを解決するために、sRGB規格のRGB信号に負値を導入した、広色域のsYCC規格がIEC 61966-2-1 AMENDMENT 1として定められた。

(b) scRGB規格¹⁰⁾ (2003年)：色域や輝度域を広げるためにIEC61966-2-2規格として定められた。RGB色信号の定義域が-0.5~7.5で負値がある。この小変更版が次期Windowsに搭載される予定である。

3. xvYCC規格 (IEC61966-2-4)

現在デジタルビデオ信号としては、HDTV (1920×1080) ではITU-R BT.709規格が、SDTV (720×480) ではITU-R BT.601規格¹¹⁾が標準の規格である(ただしBT.709規格色空間のSDTV信号等の例外も存在する)。

これらのビデオ信号を広色域化するために、sYCC規格と同様、色信号に負値を導入し、従来のITU-R BT.709/601規格の色空間と上位互換性を保ちながら、色域を広げるIEC 61966-2-4規格¹²⁾ (xvYCC規格) が定められた(2006年1月)。本規格は色空間のみの規格であり、BT.709規格の上位互換であるxvYCC₇₀₉規格と、BT.601規格の上位互換であるxvYCC₆₀₁規格を内包している。以下、主にxvYCC₇₀₉規格について解説するが、概要はxvYCC₆₀₁規格も同様である。

xvYCC₇₀₉規格には以下の特徴がある。

- (1) xvYCC₇₀₉規格の色空間をBT.709規格の色空間の上位互換にするために、BT.709規格で定義された輝度色度信号と色空間の関係は、xvYCC₇₀₉規格でも不変である(原色点、白色点、0以上1以下での光電変換特性、色信号→輝度色度信号マトリックスをBT.709規格とxvYCC₇₀₉規格で同一にした)。
- (2) xvYCC₇₀₉規格では、BT.709規格で色が定義されない輝度色度信号にBT.709色域外の色を割当て、広色域化した。
- (3) 色度信号値の1-15, 241-254 (8ビット時) も映像信号として使用し広色域化を図る。
- (4) 8, 10ビットのみならず、それ以上の n ビット量子化も定義されている。

以下規格書に則りCIE 1931 XYZ値からxvYCC値への変換方法を示す。変換の過程を図3に示す。

混色理論では、ある原色による三刺激値を別の原色による三刺激値に変換することは、線形変換(行列演算)によって可能である(例えば、CIE RGB表色系→CIE XYZ表色系

図3 xvYCC規格の色信号の変換過程

への変換)。ここではまず X, Y, Z 値(規格化された三刺激値)を、式(3)でxvYCC原色による R, G, B 値に変換する。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,2410 & -1,5374 & -0,4986 \\ -0,9692 & 1,8760 & 0,0416 \\ 0,0556 & -0,2040 & 1,0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

この変換では、色度図上で原色点による三角形より外側の色度の信号は、一つ以上の R, G, B 値が負になり、また1以上の値も取りうる。また、任意の原色点に基づく撮像素子の信号を R, G, B 値に変換する場合にも、変換行列を変更することにより、本方法を適用することができる。

次に R, G, B 値を、光電変換特性を表す式(4)～式(6)で R', G', B' 値に変換する。

$$\begin{aligned} & \text{If } R, G, B \leq -0,018 \\ & R' = -1,099 \times (-R)^{0,45} + 0,099 \\ & G' = -1,099 \times (-G)^{0,45} + 0,099 \\ & B' = -1,099 \times (-B)^{0,45} + 0,099 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{If } -0,018 < R, G, B < 0,018 \\ & R' = 4,50 \times R \\ & G' = 4,50 \times G \\ & B' = 4,50 \times B \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \text{If } R, G, B \geq 0,018 \\ & R' = 1,099 \times (R)^{0,45} - 0,099 \\ & G' = 1,099 \times (G)^{0,45} - 0,099 \\ & B' = 1,099 \times (B)^{0,45} - 0,099 \end{aligned} \quad (6)$$

上記光電変換の特性のグラフを図4に示す。

BT.709規格ではRGBの色信号が0以下、1以上では未定義なので、この領域の色信号から変換される輝度色度信号も未定義となり、信号値が存在可能であっても活用されていない。xvYCC₇₀₉規格では、BT.709規格の光電変換特性を上式のように拡張し、色信号が1以上は従来特性を延伸し、0以下(負領域)では原点に関して正領域と点対称に定義し、

図4 xvYCC規格の光電変換特性

負信号を導入することにより広色域化した. xvYCC₇₀₉規格では色信号の定義域, 値域の範囲は特に定めない.

さらに R', G', B' 値をxvYCC₇₀₉規格では式(7)で, xvYCC₆₀₁規格では式(8)で Y', Cb', Cr' 値に信号変換する(xvYCC₇₀₉規格とBT.709規格, xvYCC₆₀₁規格とBT.601規格の変換マトリックスは同一である).

$$\begin{bmatrix} Y'_{709} \\ Cb'_{709} \\ Cr'_{709} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2126 & 0,7152 & 0,0722 \\ -0,1146 & -0,3854 & 0,5000 \\ 0,5000 & -0,4542 & -0,0458 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} Y'_{601} \\ Cb'_{601} \\ Cr'_{601} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2990 & 0,5870 & 0,1140 \\ -0,1687 & -0,3313 & 0,5000 \\ 0,5000 & -0,4187 & -0,0813 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} \quad (8)$$

最後に Y', Cb', Cr' 値を Y, Cb, Cr 値に量子化する. 8ビット/channelの場合は式(9)で, Nビット/channel ($N>8$)の場合は, 式(10)で変換する.

$$\begin{aligned} Y_{xvYCC(8)} &= \text{round}[219 \times Y' + 16] \\ Cb_{xvYCC(8)} &= \text{round}[224 \times Cb' + 128] \\ Cr_{xvYCC(8)} &= \text{round}[224 \times Cr' + 128] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Y_{xvYCC(N)} &= \text{round}[(219 \times Y' + 16) \times 2^{n-8}] \\ Cb_{xvYCC(N)} &= \text{round}[(224 \times Cb' + 128) \times 2^{n-8}] \\ Cr_{xvYCC(N)} &= \text{round}[(224 \times Cr' + 128) \times 2^{n-8}] \end{aligned} \quad (10)$$

量子化後の信号の値域は, 8ビット/channelの場合は式(11)で, Nビット/channel ($N>8$)の場合は, 式(12)で与えられる.

図5 映像信号の色域の概念図

$$1 \leq Y_{xvYCC(8)}, Cb_{xvYCC(8)}, Cr_{xvYCC(8)} \leq 254 \quad (11)$$

$$2^{n-8} \leq Y_{xvYCC(N)}, Cb_{xvYCC(N)}, Cr_{xvYCC(N)} \leq 255 \times 2^{n-8} - 1 \quad (12)$$

一般にビデオ信号では上記信号値域以外の信号は, 同期検出用として用いられ, 映像信号としては使用されない. 図5は, 縦軸を輝度信号 (LUMA), 横軸を色度信号 (CHROMA) の値としたときの, 各種映像信号の色域を示した概念図である. sRGB色域は中央の菱形の領域で最も狭く, 色信号に負値を導入したsYCC色域は長方形の領域まで拡張された. xvYCC色域はさらに色度信号の領域が拡張されている.

4. xvYCC規格の色域

BT.709規格の色域を規格化された輝度 (Y軸) とxy軸の3次元空間 (Yxy座標) で表示すると, 図6の網目に示すように, 上部の高輝度部分は白色を頂点とする単峰性で下部の低輝度部分は三角柱の形状をしている.

同様に, xvYCC規格の色域を3次元空間で表示すると, 図7の網目に示すように, 等輝度原理が成り立っていないため, 高輝度部分では四峰性の突起があり, 暗くなるにつれスペクトラルローカス外まで裾が広がる形状をしている.

前者の色域をxy平面に投影した場合には図1の○で囲まれた三角形の領域になるが, 後者の色域をxy平面に投影した場合には輝度毎に形状が異なるので明確な領域は形成できない. そのため, ディスプレイの色域を比較する場合のように, 原色点による三角形の面積の比で相互の大きさを比較できない. このような色域の形状の場合には, 前述したように色票群の包含率, 例えばM.R. Pointerが提唱した

図6 BT.709規格の色域

図8 BT.709規格の色域とMunsell Color Cascade

図7 xvYCC規格の色域

図9 xvYCC規格の色域とMunsell Color Cascade

Munsell Color Cascade¹²⁾の包含率で比較する場合もある。Munsell Color Cascadeは、48色相16明度で、768色の高彩度の色票群である。

BT.709規格の色域とMunsell Color Cascade (●印)との関係を図8に示す。Munsell Color Cascadeの55%の色は、BT.709色域内 (●印が網目の内側) であるので正しく伝送できるが、45%の色は色域外 (●印が網目の外側) なので、色域限界でクリップされ正しく伝送できない。

次に、xvYCC規格の色域とMunsell Color Cascadeとの

関係を図9に示す。xvYCC規格では、Munsell Color Cascade (●) の100%の色がxvYCC色域内となり伝送時にクリップされることがない。

5. xvYCC規格と広色域ディスプレイの色域

BT.709規格においては、信号の色域とディスプレイの色域が一致しており、信号の色をすべて表示可能である。しかしxvYCC規格の信号の色域は、低輝度領域では色度座標のスペクトラルローカス外まで存在するが、このような色

図10 レーザディスプレイの色域とMunsell Color Cascade

は表示することができない。

xvYCC規格の信号をディスプレイに表示する際、前者の色域と後者の色域の共通色域がクリップされずに正しい色で表示可能であるが、後者の色域が狭い場合はクリップされて表示される。前述のようにMunsell Color Cascadeの色はxvYCC規格の信号ではクリップされずに正しく伝送されるが、CRT等のBT.709色域のディスプレイの場合では45%の色がクリップされ表示されてしまう。これらの色を正しく表示するためには広色域ディスプレイが必要である。例として、Munsell Color Cascadeと、レーザディスプレイ（例）の色域の関係を図10に示す。このように、Munsell Color Cascadeの97%の色はレーザディスプレイの色域の中にあるので、ほとんどクリップされずに表示される。当然であるがディスプレイが広色域であるほど、xvYCC規格の効果を出すことができる。

xvYCC規格では特にディスプレイの色度点の基準を定めていない。

6. 伝送システム

ソース側からディスプレイ側に送られる映像信号が、従来のBT.709/601規格か、新しいxvYCC_{709/601}規格か判定可能にしておくと、特にディスプレイ側で便利である。

HDMI規格ではVer 1.3への改訂において、伝送信号のカリメトリのタグにxvYCC信号を示す番号が追加され規格化された。またMPEG規格においても同様の拡張が審議され、規格化される見込みである。

7. むすび

現在、ビデオシステムにおいては、映像記録装置の高画素数対応化・デジタル化や、ディスプレイの高画素数化・高コントラスト化が進んで、画質が目覚ましい勢いで改善されている。本規格の制定、実用化が更なる画質の向上に貢献できれば幸いである。

(2006年8月4日受付)

〔文 献〕

- 1) Recommendation ITU-R BT.470-6: Conventional Television Systems
- 2) SMPTE Recommended Practice RP145, SMPTE C Color Monitor Colorimetry
- 3) EBU-Tech 3213 E.B.U. Standard for Chromaticity Tolerances for Studio Monitors
- 4) SMPTE Standard SMPTE 240M, For Television -1125-Line High-Definition Production Systems- Signal Parameters
- 5) Recommendation ITU-R BT.709-5, Parameter Value for HDTV Standards for Production and International Programme Exchange
- 6) International Standard IEC 61966-2-1, Multimedia Systems and Equipment -Colour Measurement and Management -, Part 2-1: Colour Management - Default RGB Colour Space - sRGB
- 7) International Standard IEC 61966-2-5, Multimedia Systems and Equipment -Colour Measurement and Management -, Part 2-Y: Colour Management -Optional RGB Colour Space - opRGB
- 8) Digital Cinema Initiatives, Digital Cinema System Specification V1.0
- 9) International Standard Iec 61966-2-1 Amendment 1, Multimedia Systems and Equipment -Colour Measurement and Management -, Part 2-1: Colour Management - Default RGB Colour Space - sRGB
- 10) International Standard Iec 61966-2-2, Multimedia Systems and Equipment -Colour Measurement and Management -, Part 2-2: Colour Management - Extended RGB Colour Space - scRGB
- 11) Recommendation ITU-R BT.601-5, Studio Encoding Parameters of Digital Television for Standard 4:3 and Wide-Screen 16:9 Aspect Ratios
- 12) International Standard Iec 61966-2-4, Multimedia Systems and Equipment-Colour Measurement and Management -, Part 2-4 : Colour Management -Extended-Gamut YCC Colour Space for Video Applications - xvYCC
- 13) Munsell Color Cascadeのデータは、英国The National Physical Laboratoryにおいて測定された。

なかぎし たけひろ
中枝 武弘 1980年、東京工業大学理学部応用物理学科卒業。同年、旭光学工業（株）入社。1990年、ソニー（株）入社。ビデオカメラ用レンズの開発、画質評価の業務を経て、現在、コアコンポーネント事業グループ、コアテクノロジー開発本部にて、広色域映像信号の検討に従事。日本光学会会員、日本視覚学会会員。